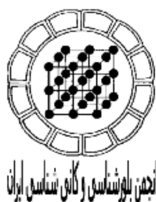
مجله بلورشناسی و کانی شناسی ایران

مقاله پژوهشی

سال بیست و هشتم، شمارهٔ اول، بهار ۹۹، از صفحهٔ ۷۱ تا ۸۲



کانی‌شناسی و زمین دما فشارسنجی شیست‌های متاپلیتی، آمفیبولیت و گارنت‌آمفیبولیت‌های مجموعه دگرگونی گل‌گهر، جنوب غرب سیرجان، ایران مرکزی

رضوان میرزایی راینی[*1]، علی احمدی[1]، حسن میرنژاد[2]، محمدبومری[1]، کازوناکاشیما[3]

۱-دانشگاه سیستان و بلوچستان، دانشکده علوم، گروه زمین شناسی

۲- دانشگاه تهران، پردیس علوم، دانشکده زمین شناسی

۳- بخش علوم زمین دانشگاه یاماگاتا، ژاپن

(دریافت مقاله: ۹۷/۱۱/۲۴، نسخه نهایی: ۹۸/۳/۲۰)

چکیده: مجموعه دگرگونی گل‌گهر در ۵۵ کیلومتری جنوب غرب سیرجان و در بخش شرقی پهنه سنندج-سیرجان قرار دارد. این مجموعه از سنگ‌های متاپلیتی، متاگریوکی و متاکربناتی تشکیل شده است. شواهد صحرایی و بررسی‌های زمین‌شیمیایی نشان می‌دهند که سنگ مادر این سنگ‌ها شامل تناوب شیل و ماسه سنگ به همراه لایه‌های کربناتی در بخش بالایی بوده است. در متاپلیت‌های مورد بررسی، گارنت‌ها غنی از آلماندن (۶۱/۳ تا ۶۳/۷ درصد) هستند. ترکیب بیوتیت‌ها در گستره بین سیدروفیلیت و آنیت و ترکیب پلاژیوکلاز از آلبیت تا انورتیت (در آمفیبولیت‌ها و گارنت آمفیبولیت‌ها) و الیگوکلاز و آندزین (در شیست‌ها) متغیر است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که آمفیبولیت و گارنت‌آمفیبولیت‌ها از نوع پارا آمفیبولیت هستند. دماهایی به‌دست آمده بر اساس زوج گارنت – بیوتیت و فشارهای برآورد شده با روش گارنت-بیوتیت-پلاژیوکلاز-کوارتز (GBPQ) برای این سنگ‌ها نشان می‌دهد که شیست‌های متاپلیتی منطقه گل‌گهر در گستره دمایی ۵۷۸-۵۵۰ درجه سانتی‌گراد و گستره فشاری ۳/۷ تا ۴/۶ کیلوبار (رخساره‌های شیست سبز و آمفیبولیت پایینی) تشکیل شده‌اند. بررسی‌های دما-فشارسنجی انجام شده بر اساس شیمی کانی آمفیبول در آمفیبولیت‌ها و گارنت آمفیبولیت‌ها به ترتیب دماهای ۵۸۹ تا ۶۱۳ و ۶۱۳ تا ۶۴۱ درجه سانتیگراد و فشارهای ۴/۷ تا ۴/۹ و ۴/۳ تا ۵/۶ کیلوبار را نشان می‌دهند که بیانگر شرایط رخساره آمفیبولیت میانی برای این سنگ‌هاست. شواهد صحرایی و بررسی‌های زمین‌شیمیایی نشان‌دهنده تغییر ناشی از افزایش دما و فشار دگرگونی از شیست‌ها تا آمفبیولیت و گارنت آمفیبولیت است که با شواهد همبری کانی‌ها همخوانی کامل دارد.

واژه‌های کلیدی: *زمین دما فشارسنجی؛ شیست‌های متاپلیتی؛ آمفیبولیت؛ گارنت‌آمفیبولیت؛ مجموعه دگرگونی گل‌گهر؛ پهنه سنندج-سیرجان، ایران مرکزی.*

مقدمه

مجموعه دگرگونی گل‌گهر در جنوب غرب شهرستان سیرجان یکی از مناطق بسیار جالب و البته مهم، برای بررسی سرزمین‌های دگرگون شده است، زیرا میزبان یکی از بزرگترین کانسارهای آهن در ایران و خاورمیانه است. در این مجموعه، سنگ‌های دگرگونی مختلف از جمله متاپلیتی، متابازیتی و متاکربناتی وجود دارند. پژوهشگران مختلفی این منطقه بررسی کرده‌اند (برای مثال، [۱-۷]). یعقوبی [۱] زمین‌شیمی و شکل گیری کانسار شماره ۲ گل‌گهر را بررسی کرده است. همبرزایی و سنگ‌زایی کانسار سنگ آهن گل گهرتوسط پورخاک [۲] بررسی شده است. الگوی کانسارسازی، خاستگاه و شکل‌گیری کانسار به ترتیب توسط بابکی و آفتابی [۳]، بیاتی راد [۴] و اصغری [۵] بررسی شده است. زمین‌شیمی عناصر فرعی و کمیاب سنگ آهن و خاستگاه گوگرد و کانی‌های سولفیدی موجود در سنگ آهن توسط ترابیان [۶] و دالفردی [۷] بررسی شده است. بیشتر بررسی‌های انجام شده در منطقه پیرامون

*نویسنده مسئول، تلفن: ۰۹۱۳۳۹۷۹۲۳۲، پست الکترونیکی: Rezvanmirzaei@pgs.usb.ac.ir

[Downloaded from ijcm.ir on 2025-03-16]

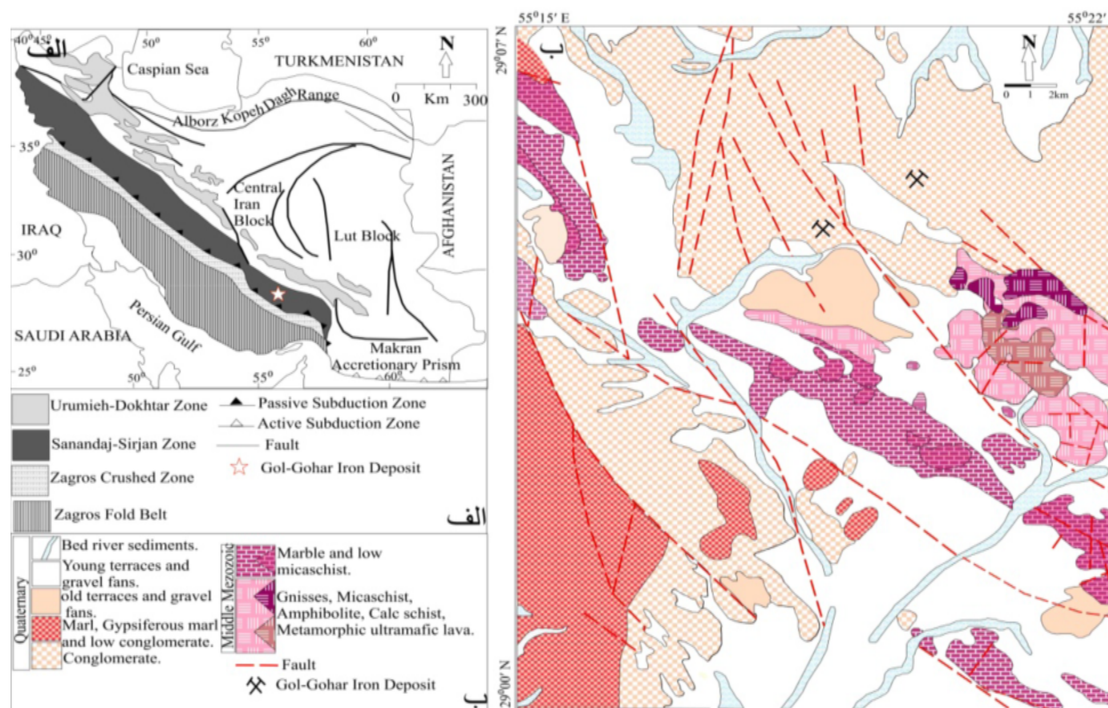
[DOR: 20.1001.1.17263689.1399.28.1.5.5]

[DOI: 10.29252/ijcm.28.1.71]

شکل‌گیری کانسار بوده است و دما و فشارسنجی متاپلیت‌های موجود در منطقه کمتر مورد توجه قرار گرفته است. سنگ‌های متاپلیتی در همسایگی کانسار قرار دارند. بررسی زمین‌شیمی و دما فشارسنجی سنگ‌های متاپلیتی از اهمیت بالایی برخوردار است. زمین دما فشارسنجی معتبر یکی از ابزارهای مهم و اساسی در تفسیر شرایط دگرگونی و فهم تکامل پوسته‌ای است [۸]. با پیشرفت‌های عمده در زمینه ترمودینامیک سنگ‌ها، بسیاری از زمین دماسنجها و زمین فشارها جهت تعیین شرایط دگرگونی سنگ‌ها از رخساره‌های شیست سبز تا گرانولیت و دماهای بالاتر و همچنین از فشارهای پایین تا بالا وجود دارند [۸]. در این پژوهش با استفاده از تجزیه شیمیایی نقطه‌ای (ریزپردازش الکترونی) کانی‌های بیوتیت، آمفیبول، گارنت و پلاژیوکلاز، شرایط دما و فشار حاکم بر دگرگونی در متاپلیت‌ها تعیین شده است. این نتایج می‌تواند در تفسیر نتایج مربوط به شکل گیری کانسار نیز مؤثر باشد.

زمین‌شناسی عمومی

مجموعه دگرگونی گل‌گهر در ۵۵ کیلومتری جنوب غرب شهرستان سیرجان و بخش جنوبی پهنه سنندج-سیرجان [۹-۱۲] واقع است (شکل ۱). پهنه ساختاری سنندج-سیرجان به‌صورت نوار باریکی با طول حدود ۱۵۰۰ کیلومتر و عرض تقریبی ۲۰۰ کیلومتر، بین شهرهای سنندج در شمال‌غرب و سیرجان در جنوب‌شرق قرار دارد. در مقایسه با سنگ‌های آتشفشانی و رسوب‌های مزوزوئیک که در پهنه سنندج - سیرجان فراوان هستند، سنگ‌های پالئوزوئیک به نسبت کم هستند و تنها در بخش جنوبی این پهنه قرار دارند [۱۳]. سنگ‌های دگرگونی موجود در منطقه گل‌گهر عبارتند از متاپلیت‌ها، متابازیت‌ها و متاکربنات‌ها. متاپلیت‌های موجود در منطقه به دلیل حضور کانی‌های شاخص رخساره شیست سبز به رنگ‌های سبز روشن تا تیره مایل به سیاه دیده می‌شوند و انواع سنگ‌های شیستی به شدت متورق تا گنیس‌ها را شامل می‌شوند. متابازیت‌ها شامل آمفیبول شیست‌ها، آمفیبولیت‌ها و گارنت آمفیبولیت‌ها هستند که به دلیل سختی بالا، طی مشاهدات صحرایی به راحتی از سایر واحدها قابل شناسایی هستند. سنگ‌های متاکربناتی به صورت متناوب همراه با متاپلیت‌ها وجود دارند و نوک همه واحدهای سنگی منطقه را نیز پوشانده‌اند. اندازه‌گیری نسبت‌های ایزوتوپی آرگون به بیوتیت و هورنبلند شیست‌های مجموعه دگرگونی گل‌گهر، سن دگرگونی را ژوراسیک میانی نشان داده است [۱۴]. منطقه گل-گهر اغلب از آبرفت‌های عهد حاضر پوشیده شده‌اند و رخنمون-های محدودی از سنگ‌های دگرگونی در جنوب و جنوب‌غرب، سنگ‌های رسوبی در شرق و توده نفوذی گرانیت میلونیتی شده به شکل گنبد کم ارتفاع در جنوب کانسار برونزد دارند [۱۲].



شکل ۱ الف) موقعیت منطقه گل‌گهر بر پهنه ساختاری سنندج-سیرجان و جایگاه این پهنه نسبت به دیگر پهنه‌های ساختاری در ایران [۹-۱۱]؛ ب) نقشه زمین‌شناسی منطقه گل‌گهر و موقعیت کانسار آهن گل‌گهر بر آن [۱۲].

[Downloaded from ijcm.ir on 2025-03-16]
[DOR: 20.1001.1.17263689.1399.28.1.5.5]
[DOI: 10.29252/ijcm.28.1.71]

روش بررسی

برای دسترسی به هدف‌های یاد شده، پس از ارزیابی گزارش‌های موجود، به بازدید از منطقه و بررسی شواهد صحرایی پرداختیم. از مغزه‌های حفاری و رخنمون‌های سنگی نمونه‌برداری شد و از نمونه‌های برداشته شده، تعداد ۱۰۰ مقطع نازک و نازک صیقلی تهیه شد. پس از بررسی‌های سنگ‌نگاری بر اساس تنوع کانی‌شناسی و رخساره‌های دگرگونی ، تعدادی از مقاطع نازک صیقلی برای تجزیه شیمیایی کانی‌ها انتخاب شد. تجزیه شیمیایی نمونه‌ها توسط دستگاه ریزکاوالکترونی در بخش علوم زمین و محیط زیست دانشگاه یاماگاتای ژاپن، انجام شد. عناصر اصلی در کانی‌ها توسط ابرکاوشگر خودکار مدل JEOL JXA-8600M با ولتاژ شتاب دهنده ۱۵keV و جریان پرتو ۲nA تجزیه شدند. استانداردهای به‌کار رفته آپاتیت، ولاستونیت، آلبیت و آدولاریا مرکب از $SiO_2, TiO_2, Al_2O_3, Cr_2O_3, Fe_2O_3$, MnO, MgO, CaF_2 و NaCl بودند. برای زمین دما فشارسنجی بر اساس داده‌های به‌دست آمده، فرمول شیمیایی برای هر کانی محاسبه و سرانجام دما و فشار محاسبه شده و نتایج آن تفسیر شد.

سنگ‌نگاری سنگ‌های منطقه

متاپلیت‌ها از فراوان‌ترین سنگ‌های موجود در منطقه هستند. سطوح براق سنگ‌های متاپلیتی به دلیل حضور فراوان میکاها، و شیستوارگی این سنگ‌ها در شناسایی آن‌ها طی مشاهدات صحرایی مؤثر است. این سنگ‌ها شامل: میکاشیست‌ها، گارنت میکاشیست‌ها و سیلیمانیت‌شیست‌ها هستند. متابازیت‌های موجود در منطقه گل‌گهر (آمفیبول شیست، آمفیبولیت و گارنت آمفیبولیت‌ها) بصورت همیافت با سنگ‌های متاپلیتی حضور دارند. ترکیب کانی‌شناسی و بررسی سنگ کل متابازیت‌ها نشان می‌دهد که آن‌ها از نوع پاراآمفیبولیت هستند. سختی سنگ‌های متابازیتی شناسایی آن‌ها را در مشاهدات صحرایی آسان کرده است.

میکاشیست‌ها: از نظر سنگ‌نگاری، این سنگ‌ها دارای مجموعه کانی‌های اصلی کوارتز (۳۰-۲۰ درصد)، موسکویت (۲۰-۱۰ درصد)، بیوتیت (۳۰-۲۰ درصد)، پلاژیوکلاز (۱۵-۱۰ درصد) هستند. کلسیت، اپیدوت و کانی‌های کدر شامل مگنتیت و به مقدار کم‌تر پیریت (۱۰-۵ درصد) نیز به صورت کانی‌های فرعی حضور دارند (شکل ۲ الف). حضور کانی‌های میکایی سبب شیستوارگی نمایان و رنگ براق در این سنگ‌ها شده است. مجموعه کانی‌های موجود در این سنگ نشان می‌دهد که سنگ در رخساره شیست سبز دگرگون شده است.

گارنت میکاشیست: این سنگ‌ها اغلب دربردارنده بیوتیت (۳۰-۲۰)، موسکویت (۲۰-۱۰ درصد)، گارنت (۲۰-۱۰ درصد)، فلدسپار قلیایی از نوع ارتوکلاز (۱۰-۵ درصد)، کوارتز (۱۵-۱۰ درصد) به عنوان کانی‌های اصلی، و اپیدوت، کلریت، کلسیت و کانی‌های کدر به عنوان کانی‌های فرعی هستند (شکل ۲ ب). گارنت‌های موجود در این نمونه‌ها بصورت شکل‌دار تا نیمه شکل‌دار و در اندازه‌هایی حدود ۵ میلیمتر تا یک سانتی‌متر حضور دارند و برخی از نمونه‌ها شامل میانبارهایی از کوارتز و بیوتیت هستند که بافت غربالی را تشکیل داده‌اند. تورق زمینه سنگ تورق تخته سنگی تا شیستوزیته ریزدانه است. مجموعه کانی‌های موجود در این سنگ نشان می‌دهد که سنگ در رخساره شیست سبز دگرگون شده است.

سیلیمانیت شیست: سیلیمانیت موجود در سیلیمانیت شیست‌های منطقه گل‌گهر به‌صورت بلورهای بلند و سوزنی شکل دیده می‌شود که سبب تشکیل بافت نخ شکفتی در این سنگ‌ها شده است. سیلیمانیت شیست‌های موجود در منطقه از کانی‌های اصلی گارنت (۱۵-۱۰ درصد)، بیوتیت (۲۰-۱۰ درصد)، موسکویت (۱۰-۵ درصد)، کوارتز (۱۰-۵ درصد)، فلدسپات قلیایی (۱۰-۵ درصد) و سیلیمانیت (۳۰-۲۰ درصد) تشکیل شده‌اند. کانی‌های کدر که بیشتر از نوع مگنتیت هستند به‌صورت فرعی در این سنگ‌ها حضور دارند (شکل ۲ پ). حضور سیلیمانیت در سنگ‌های منطقه نشان از افزایش دما و پیشرفت دگرگونی دارد.

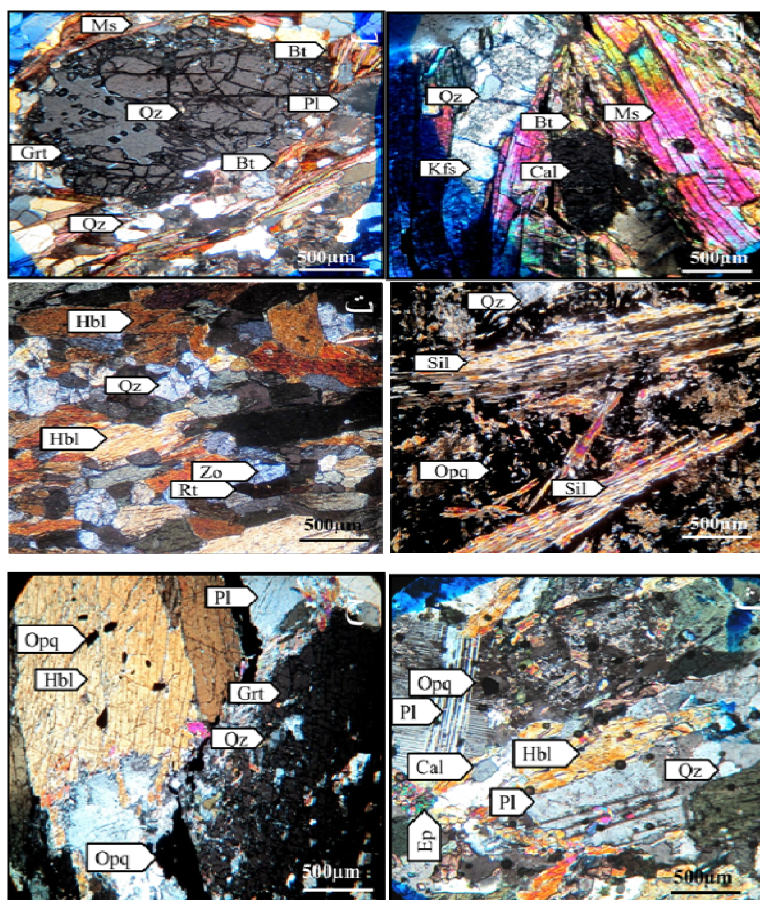
آمفیبول شیست: این سنگ‌ها از مجموعه کانی‌های آمفیبول (۷۰-۶۰ درصد)، کوارتز (۲۰-۱۰ درصد)، کلریت (۱۰-۵ درصد)، موسکویت (۱۰-۵ درصد)، اپیدوت و کانی‌های کدر تشکیل شده‌اند. زوئیزیت و رتیل به طور کمیاب حضور دارند. آمفیبول‌های موجود در این سنگ‌ها بیشتر به‌صورت سوزنی هستند و بافت نخ شکفتی دارند (شکل ۲ ت). حضور فراوان آمفیبول‌های سوزنی در برخی از نمونه‌ها، سبب ایجاد خطوارگی چشم‌گیری شده است و عدم حضور پلاژیوکلاز در این سنگ‌ها انتخاب واژه آمفیبول شیست را برای این سنگ‌ها مناسب‌تر می‌کند. روتیل نیز در این نمونه‌ها با رنگ قهوه‌ای مایل به قرمز دیده می‌شود.

آمفیبولیت: در منطقه مورد بررسی، آمفیبولیت‌ها بیشتر به صورت همیافت با سایر سنگ‌ها به ویژه شیست‌ها دیده می‌شوند. این سنگ‌ها در نمونه دستی به رنگ سبز تیره بوده و منشورهای هورنبلند در این نمونه‌ها قابل مشاهده هستند. اجزای اصلی سازنده سنگ را کانی‌های هورنبلند، پلاژیوکلاز و

[Downloaded from ijcm.ir on 2025-03-16]
[DOR: 20.1001.1.17263689.1399.28.1.5.5]
[DOI: 10.29252/ijcm.28.1.71]

با مقادیر کمتر فلدسپات قلیایی و کوارتز تشکیل می‌دهند (شکل ۲ ث). اپیدوت، اسفن، بیوتیت، کلریت، کلسیت و کانی-های کدر نیز به صورت فرعی در این سنگ‌ها حضور دارند. بلورهای هورنبلند با فراوانی حدود ۴۰ درصد در این سنگ‌ها حضور دارند و در راستای فشارهای زمین‌ساختی به طور موازی با هم آرایش‌یافته و جهت‌یافتگی مشخص ایجاد کرده‌اند که در سنگ بافت نخ شکفتی را گسترش داده است. اندازه‌ی بلورهای هورنبلند متغیر بوده و در برخی از آمفیبولیت‌های درشت بلور، به بیش از یک سانتی‌متر می‌رسد. این بلورهای هورنبلند به دو صورت منشوری و دوکی شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار سبزرنگ با چند رنگی سبز تا قهوه‌ای کمرنگ حضور دارند. پلاژیوکلاز موجود در آمفیبولیت‌های مورد بررسی بافراوانی حدود ۳۰ درصد، غنی از آلبیت و الیگوکلاز هستند و به‌صورت شکل‌دار تا نیمه شکل‌دار دیده می‌شوند. کوارتز در بیشتر نقاط این سنگ‌ها به چشم می‌خورد. این دانه‌های کوارتز به صورت ریز و بی‌شکل در زمینه سنگ دیده می‌شوند.

گارنت آمفیبولیت: در برخی از آمفیبولیت‌ها، درشت بلورهای گارنت با قطر حدود ۵ میلی‌متر و با فراوانی حدود ۱۰ درصد دیده می‌شوند (شکل ۲ ج). این بلورهای گارنت بیشتر نیمه شکل‌دار بوده و گاهی دارای میانبارهایی از کواتز نیز هستند. بلورهای کوارتز نیز به مقدار کم و حدود ۱۰ درصد حجم سنگ را به خود اختصاص داده‌اند که به علت تحمل تنش طی دگرریختی به حالت ریزدانه درآمده‌اند و خاموشی موجی نشان می‌دهند. فلدسپات‌های قلیایی و پلاژیوکلاز (۴۰ درصد)، هورنبلند (۴۵ درصد) از کانی‌های اصلی این سنگ‌ها هستند. کلریت و کانی‌های کدر نیز بصورت فرعی در این سنگ‌ها حضور دارند. بلورهای تیتانیت نیز به طور پراکنده و از کانی‌های کمیاب این سنگ‌ها هستند. بافت‌های دیده شده در گارنت آمفیبولیت‌های منطقه اغلب از نوع نخ شکفتی و غربالی است.



شکل۲ تصاویر میکروسکوپی (در نور قطبیده متقاطع، XPL) از متاپلیت‌های منطقه گل‌گهر: الف) ب) درشت بلور گارنت به همراه موسکویت و بیوتیت در گارنت میکاشیست‌ها، پ) رشته‌های سیلیمانیت به همراه کانی‌های کدر در سیلیمانیت شیست‌ها، ت) آمفیبول شیست‌ها، ث) آمفیبولیت‌ها به همراه جهت یافتگی بلورهای آمفیبول و پلاژیوکلازها با ماکل چندریختی و ج) گارنت آمفیبولیت‌ها علائم اختصاری کانی‌ها برگرفته از مرجع [۱۵] است.

[Downloaded from ijcm.ir on 2025-03-16]
[DOR: 20.1001.1.17263689.1399.28.1.5.5]
[DOI: 10.29252/ijcm.28.1.71]

[Downloaded from ijcm.ir on 2025-03-16]
[DOR: 20.1001.1.17263689.1399.28.1.5.5]
[DOI: 10.29252/ijcm.28.1.71]

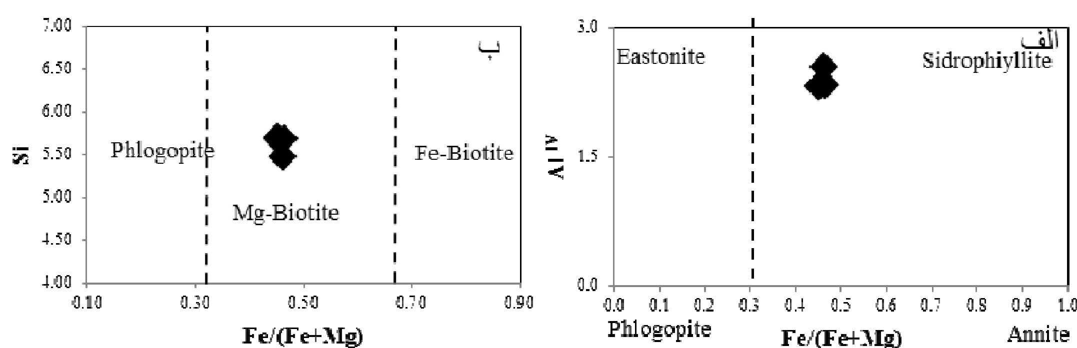
شیمی کانی‌ها

بررسی شیمی کانی‌ها نقش مهمی در شناخت شرایط فیزیکوشیمیایی تشکیل سنگ‌های منطقه دارد. ترکیب دقیق شیمی کانی‌ها با استفاده از تجزیه ریزکاو الکترونی بر کانی‌های اصلی و فرعی تعیین و سپس با استفاده از نتایج شیمی کانی‌های بیوتیت، گارنت، پلاژیوکلاز و آمفیبول، شرایط دما و فشار طی دگرگونی مشخص شد.

بیوتیت: بیوتیت از کانی‌های مهم فرومنیزین در سنگ‌هاست. از ترکیب شیمیایی بیوتیت‌ها می‌توان برای تعیین شرایط فیزیکوشیمیایی تشکیل این کانی استفاده کرد. نتایج تجزیه ریزکاوالکترونی بیوتیت‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. فرمول ساختاری بیوتیت و نوع آن‌ها بر اساس نتایج تجزیه شیمی و تعداد ۲۲ اکسیژن تعیین شده است. بیوتیت محلول جامد چهار عضو انتهایی یعنی آنیت $KFe_3AlSi_3O_{10}(OH)_2$، سیدروفیلیت $KFe_2Al[Al_2Si_2O_{10}](OH)_2$، فلوگوپیت $KMg_3AlSi_3O_{10}(OH)_2$ و ایستونیت $KMg_2Al[Al_2Si_2O_{10}](OH)_2$ است که بر پایه این چهار فاز، نموداری به نام چهارضلعی (ASPE) طراحی شده است که برای تعیین ترکیب میکاهای هشت‌وجهی سه‌گانه به‌کار می‌رود. در این چهارضلعی، دو متغیر $Fe/(Fe + Mg)$ و Al^{IV} به کار گرفته شده‌اند. ترکیب بیشتر بیوتیت‌های سنگ‌های دگرگونی منطقه گل‌گهر در نمودار رده‌بندی میکاها [۱۶]، در گستره ترکیبی بین سیدروفیلیت و آنیت قرار دارند (شکل۳ الف). همه نمونه‌ها دارای $Mg/(Mg + Fe) > 5$ و Al مجموع $3 >$ هستند. نمودار تغییرات $Fe/(Fe + Mg)$ و Si [۱۷] نشان می‌دهد که این بیوتیت‌ها از نوع بیوتیت‌های غنی از منیزیم هستند (شکل۳ ب).

جدول۱ نتایج تجزیه ریزکاوالکترونی بیوتیت‌های منطقه گل‌گهر از درون کانی گارنت (مقادیر F و Cl اندازه‌گیری و مقدار OH محاسبه شده است. همه Fe در این نمونه‌ها دو ظرفیتی فرض شده است).

نقاط	۱-۲	۱-۴	۱-۵
گارنت میکا شیست (بیوتیت)			
ترکیب اکسید (wt%)			
SiO_2	۳۸/۴۶	۳۸/۱۱	۳۵/۰۷
TiO_2	۰/۷۹	۰/۸۶	۰/۹۲
Al_2O_3	۱۸/۵۶	۱۸/۱۵	۱۷/۹۳
FeO	۱۷/۵۴	۱۷/۸۴	۱۷/۴۳
MnO	۰/۱۷	۰/۰۷	۰/۱۸
MgO	۱۱/۷۵	۱۱/۴۹	۱۱/۳۱
CaO	۰/۰۱	۰/۰۶	۰/۰۴
Na_2O	۰/۲۲	۰/۲۸	۰/۳۱
K_2O	۹/۱۱	۹/۱۴	۹/۲۳
BaO	۰/۱۷	۰۰/۰	۰/۱۳
NiO	۰/۰۳	۰۰/۰	۰/۰۱
F	۰/۲۹	۰/۰۱	۰/۱۳
Cl	۰۰/۰	۰/۰۰	۰/۰۶
OH	۳/۹۳	۴/۰۲	۳/۷۷
excess O	۰/۱۲	۰/۰۱	۰/۰۷
مجموع	۱۰۰/۹۱	۱۰۰/۰۳	۹۶/۴۴
تعداد کانیون‌ها براساس ۲۲ اکسیژن			
Si	۵/۶۶	۵/۶۷	۵/۴۷
Ti	۰/۰۹	۰/۱۰	۰/۱۱
Al^{iv}	۲/۳۴	۲/۳۳	۲/۵۳
Al^{vi}	۰/۸۹	۰/۸۵	۰/۷۶
Fe	۲/۱۶	۲/۲۲	۲/۲۷
Mn	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۲
Mg	۲/۵۸	۲/۵۵	۲/۶۳
Ca	۰۰/۰	۰/۰۱	۰/۰۱
Na	۰/۰۶	۰/۰۸	۰/۰۹
K	۱/۷۱	۱/۷۳	۱/۸۴
Ba	۰/۰۱	۰۰/۰	۰/۰۱
Ni	۰۰/۰	۰۰/۰	۰۰/۰
F-mol	۰/۱۳	۰/۰۱	۰/۰۶
Cl-mol	۰۰/۰	۰/۰۱	۰/۰۲
OH-mol	۳/۸۷	۳/۹۹	۳/۹۲
Mg/Mg+Fe	۰/۵۴	۰/۵۳	۰/۵۴



شکل۳ جایگاه بیوتیت‌های تجزیه شده بر الف) نمودار Al^{IV} نسبت به Fe/(Fe+Mg) [۱۶] و ب) نمودار Si نسبت به Fe/(Fe+Mg) [۱۷].

گارنت: گارنت‌ها از مهم‌ترین گروه کانی‌های ارتوسیلیکاتی هستند که در انواع گسترده‌ای از محیط‌های زمین‌شناسی یافت می‌شوند [۱۸]. در واقع کانی‌های گروه گارنت مشخص کننده سنگ‌های دگرگونی هستند، اما در بعضی سنگ‌های آذرین و همچنین در رسوب‌ها به صورت دانه‌های تخریبی نیز دیده می‌شوند. در اصل گارنت را می‌توان شاخص سنگ‌زادی مفیدی تلقی کرد، البته نه فقط به دلیل پایداری آن در گستره وسیعی از دما، بلکه توزیع آهسته کاتیون‌ها در گارنت موجب می‌شود که بتوان آن را در بسیاری از دماسنج‌ها به‌کار برد.

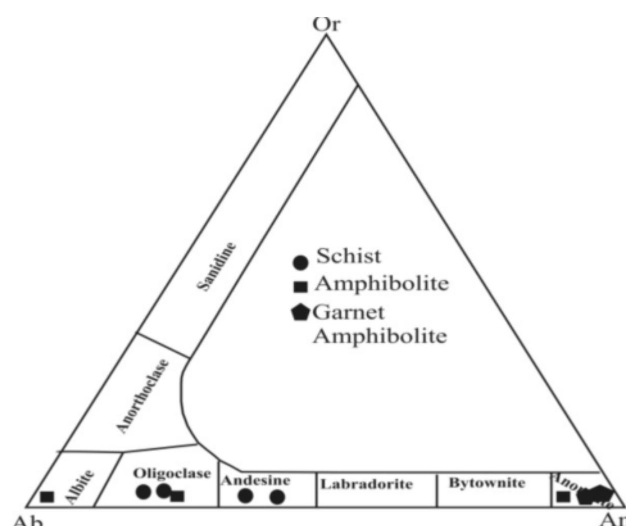
برای بررسی ترکیب شیمیایی گارنت در سنگ‌های مورد بررسی منطقه گل‌گهر، نمونه‌های مختلف گارنت میکاشیست‌ها با ریزکاو الکترونی تجزیه شدند. برای محاسبه درصد مولی اعضای نهایی گارنت بر حسب نسبت Fe^{+2}/Fe^{+3} و تعیین نوع گارنت از روش مرجع [۱۹] استفاده شد. ترکیب گارنت‌های موجود در گارنت میکاشیست‌های مورد بررسی غنی از آلماندن و به صورت $Alm_{61.55-63.31}$ $Sps_{4.02-6.58}$ $Prp_{9.54-13.97}$ $Grs_{18.82-20.73}$ است. گارنت‌های موجودر در گارنت آمفیبولیت‌های منطقه گل‌گهر نیز غنی از آلماندن و به‌صورت ($Alm_{66.5-67.2}$ $Sps_{3.1-3.9}$ $Prp_{14.7-12.8}$ $Grs_{14.7-15.1}$) هستند (جدول ۲). چنان که دیده می‌شود، سه سازای مهم در ترکیب گارنت‌های مورد بررسی آلماندن، پیروپ و گروسولار هستند.

جدول۲ نتایج تجزیه ریزکاو الکترونی گارنت در گارنت شیست‌ها و گارنت آمفیبولیت‌های منطقه گل‌گهر (درون کانی گارنت).

نقاط	GO4-70-8	GO4-70-7	GO4-70-6			GO2-98-1-6	GO2-98-1-7	
نمونه گارنت میکاشیست						گارنت آمفیبولیت		
(wt%) ترکیب اکسید								
SiO_2	۳۸٫۸۳	۳۸٫۱۰	۳۸٫۹۵			۳۷٫۳۴	۳۶٫۵۱	
TiO_2	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۵			۰٫۰۵	۰٫۰۰	
Al_2O_3	۲۱٫۱۵	۲۱٫۹۸	۲۱٫۷۱			۲۲٫۳۱	۲۱٫۷۰	
FeO	۲۸٫۶۴	۲۹٫۶۴	۲۹٫۴۰			۳۱٫۸۴	۳۱٫۳۵	
MnO	۱٫۸۴	۲٫۰۴	۱٫۹۷			۱٫۳۶	۱٫۶۶	
MgO	۳٫۵۶	۲٫۵۰	۲٫۶۵			۳٫۶۸	۳٫۱۴	
CaO	۷٫۵۳	۷٫۵۱	۶٫۸۷			۵٫۴۸	۵٫۴۸	
مجموع	۱۰۱٫۶	۱۰۱٫۸	۱۰۱٫۶			۱۰۲٫۰۶	۹۹٫۸۵	
تعداد کاتیون ها براساس ۱۲ اکسیژن								
Si	۳٫۰۳	۳٫۰۰	۳٫۰۱			۲٫۹۱	۲٫۹۱	
Ti	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰			۰٫۰۰	۰٫۰۰	
Al	۱٫۹۴	۱٫۹۹	۱٫۹۸			۲٫۰۵	۲٫۰۵	
Fe^{3+}	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۱			۰٫۱۴	۰٫۱۳	
Fe^{2+}	۱٫۸۶	۱٫۹۰	۱٫۸۹			۱٫۹۳	۱٫۹۶	
Mn	۰٫۱۲	۰٫۲۰	۰٫۱۳			۰٫۰۹	۰٫۱۱	
Mg	۰٫۴۱	۰٫۲۹	۰٫۴۲			۰٫۴۳	۰٫۳۷	
Ca	۰٫۶۳	۰٫۶۲	۰٫۵۷			۰٫۴۶	۰٫۴۷	
مجموع	۸	۸	۸			۸	۸	
(٪ کسر مولی) سازای گارنت								
آلماندین	۶۱٫۵۵	۶۳٫۳۱	۶۲٫۸۹			۶۶٫۵۰	۶۷٫۲۰	
اسپسارتین	۴٫۰۲	۶٫۵۸	۴٫۲۸			۳٫۱	۳٫۹	
پیروپ	۱۳٫۶۶	۹٫۵۴	۱۳٫۹۷			۱۴٫۷	۱۲٫۸	
گروسولار	۲۰٫۷۳	۲۰٫۵۴	۱۸٫۸۲			۱۴٫۷	۱۵٫۱	

[Downloaded from ijcm.ir on 2025-03-16]
[DOR: 20.1001.1.17263689.1399.28.1.5.5]
[DOI: 10.29252/ijcm.28.1.71]

فلدسپارها: نقاط مختلف از فلدسپارهای منطقه در نمونه‌های متاپلیتی با ریزکاوالکترونی تجزیه شدند. بر اساس تقسیم‌بندی مرجع [۱۸]، ترکیب پلاژیوکلاز شیست‌های منطقه در گستره‌ای بین $An_{12.98}$ تا $An_{41.12}$ قرار دارند. ترکیب پلاژیوکلاز در آمفیبولیت‌ها $An_{4.13-92.60}$، و در گارنت آمفیبولیت‌ها $An_{96.80-99.87}$ است (شکل ۴). نتایج تجزیه ریزکاو الکترونی فلدسپارهای موجود در متاپلیت‌های منطقه در جدول ۳ ارائه شده است. افزایش مقدار انورتیت پلاژیوکلاز در گارنت آمفیبولیت‌ها نسبت به آمفیبولیت‌ها و متاپلیت‌ها نشان از افزایش دما و فشار و پیشرفت دگرگونی دارد.



شکل ۴ رده‌بندی فلدسپارها در سنگ‌های دگرگونی منطقه گل‌گهر [۱۶].

جدول۳ نتایج تجزیه ریزکاوالکترونی فلدسپارها در متاپلیت‌های منطقه گل‌گهر.

نقاط	۱-۳	۱-۴	۲-۶	۲-۷	۱-۸	۳-۷	۲-۷	۲-۱	۴-۶
سنگ		میکاشیست			آمفیبولیت			گارنت آمفیبولیت	
(wt%) ترکیب اکسید									
SiO_2	۵۹٫۴۸	۶۱٫۴۲	۶۳٫۸۳	۶۵٫۹۲	۶۴٫۰۶	۶۹٫۱۵	۶۶٫۲۳	۵۵٫۶۴	۳۶٫۰۹
Al_2O_3	۲۴٫۳۲	۲۳٫۳۰	۲۱٫۵۴	۲۱٫۴۸	۲۲٫۶۲	۲۰٫۵۶	۲۲٫۸۱	۲۲٫۹۶	۱۵٫۴۵
TiO_2	۰٫۰۰	۰٫۰۳	۰٫۰۰	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۴	۰٫۰۰
FeO_t	۰٫۷۶	۰٫۳۸	۰٫۰۷	۰٫۰۳	۰٫۰۸	۰٫۰۳	۰٫۰۴	۰٫۰۹	۰٫۰۱
MgO	۰٫۰۰	۰٫۰۳	۰٫۰۶	۰٫۰۳	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۱	۰٫۰۲	۰٫۰۳
Na_2O	۷٫۳۳	۷٫۰۲	۹٫۷۹	۸٫۸۱	۰٫۵۶	۱۱٫۱۱	۹٫۳۳	۰٫۰۳	۰٫۰۰
CaO	۹٫۳۳	۷٫۳۹	۲٫۶۶	۲٫۵۸	۱۳٫۴۰	۰٫۸۷	۳٫۴۹	۱۹٫۷۵	۴۸٫۹۵
MnO	۰٫۰۷	۰٫۰۰	۰٫۰۲	۰٫۰۱	۰٫۰۴	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰
F	۰٫۰۰	۰٫۲۶	۰٫۱۹	۰٫۰۳	۰٫۰۳	۰٫۰۰	۰٫۰۶	۰٫۱۵	۰٫۰۶
K_2O	۰٫۰۸	۰٫۱۱	۰٫۰۷	۰٫۱۴	۰٫۰۵	۰٫۰۴	۰٫۰۴	۰٫۰۹	۰٫۰۵
مجموع	۱۰۱٫۳۷	۹۹٫۸۴	۹۸٫۱۶	۹۹٫۰۷	۱۰۰٫۸۹	۱۰۱٫۷۷	۱۰۲٫۰۳	۹۹٫۱۳	۱۰۰٫۷۳
تعداد کاتیون‌ها براساس ۸ اکسیژن									
Si	۲٫۶۵	۲٫۷۴	۲٫۸۶	۱٫۰۵	۲٫۸۰	۲٫۹۷	۲٫۸۵	۲٫۵۶	۱٫۹۰
Al	۱٫۲۸	۱٫۲۳	۱٫۱۴	۰٫۴۰	۱٫۱۶	۱٫۰۴	۱٫۱۶	۱٫۲۵	۰٫۹۶
Ti	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰
Fe	۰٫۰۳	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰
Mg	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰
Na	۰٫۶۳	۰٫۶۱	۰٫۸۵	۰٫۲۷	۰٫۰۳	۰٫۹۲	۰٫۷۸	۰٫۰۲	۰٫۰۰
Ca	۰٫۴۴	۰٫۳۵	۰٫۱۳	۰٫۰۴	۰٫۶۳	۰٫۰۴	۰٫۱۶	۰٫۹۷	۲٫۷۶
Mn	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰
F	۰٫۰۰	۰٫۰۴	۰٫۰۳	۰٫۰۰	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۱	۰٫۰۲	۰٫۰۱
K	۰٫۰۰	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۱	۰٫۰۰
(٪ کسر مولی) سازای فلدسپار									
Or	۰٫۴۱	۰٫۶۵	۰٫۴۱	۰٫۹۱	۰٫۴۴	۰٫۲۳	۰٫۲۳	۰٫۵۴	۰٫۱۳
Ab	۵۸٫۴۶	۶۲٫۸۲	۸۶٫۶۰	۸۵٫۳۲	۶٫۹۷	۹۵٫۶۴	۸۲٫۶۹	۲٫۶۶	۰٫۰۰
An	۴۱٫۱۲	۳۶٫۵۳	۱۲٫۹۸	۱۳٫۷۷	۹۲٫۶۰	۴٫۱۳	۱۷٫۰۸	۹۶٫۸۰	۹۹٫۸۷

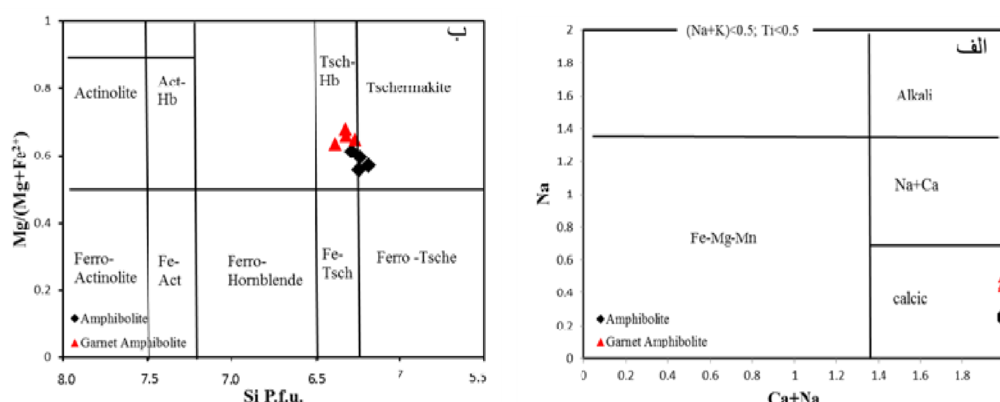
[Downloaded from ijcm.ir on 2025-03-16]
[DOR: 20.1001.1.17263689.1399.28.1.5.5]
[DOI: 10.29252/ijcm.28.1.71]

آمفیبول: آمفیبول فراوان‌ترین کانی فرومنیزین در سنگ‌های منطقه گل‌گهر است. نتایج تجزیه ریزکاو الکترونی آمفیبول‌های موجود در آمفیبولیت‌ها و گارنت آمفیبولیت‌ها، و فرمول ساختاری آن‌ها بر اساس ۲۳ اکسیژن در جدول ۴ ارائه شده است. بیشتر آمفیبول‌ها در دو گروه سنگی آمفیبولیت و گارنت آمفیبولیت، با $(Na+K)_A<0.5$ و $Ti<0.5$ در گروه آمفیبول‌های کلسیمی قرار می‌گیرند [۲۰]. تنها یک نمونه آمفیبول در گارنت آمفیبولیت، دارای مقدار Ti بیش از یک a.p.f.u (۱٫۶۷۲) بوده، اما مقدار $(Na+K)_A$ این نمونه ۰٫۰۵۱ است. در گروه آمفیبولیت‌ها، سه نمونه مقدار $(Na+K)_A$ کمی بیش از ۰٫۵، اما مقدار Ti کمتر از ۰٫۵ دارند. چنان که در شکل (۵ الف) نیز مشخص است، بر اساس رده‌بندی مرجع [۲۰]، ترکیب آمفیبول‌های مورد بررسی در گستره آمفیبول‌های کلسیمی قرار دارد. نامگذاری آمفیبول‌ها با استفاده از نمودار مرجع [۲۰]، در شکل ۵ ب آورده شده که ترکیب شیمیایی آمفیبول‌ها در گارنت آمفیبولیت‌ها از نوع چرماکیت‌هورنبلند است. ترکیب شیمیایی آمفیبول‌ها در آمفیبولیت‌ها از نوع چرماکیت و چرماکیت‌هورنبلند است.

جدول ۴ نتایج تجزیه ریزکاوالکترونی آمفیبول‌های موجود در آمفیبولیت و گارنت‌آمفیبولیت‌های منطقه گل‌گهر.

نمونه		آمفیبولیت				گارنت آمفیبولیت			
نقاط	GO2-92 1-1	GO2-92 1-2	GO2-92 2-1	GO2-92 2-2	GO2-92 3-1	GO2-98 1-3	GO2-98 1-4	GO2-98 1-5	GO2-98 2-3
(Wt%)ترکیب اکسید									
SiO_2	۴۵٫۱۴	۴۴٫۵۵	۴۴٫۲۳	۴۵٫۱۴	۴۴٫۷۱	۴۴٫۶۳	۴۵٫۳۷	۴۴٫۰۳	۴۴٫۵۰
TiO_2	۰٫۶۸	۰٫۶۳	۰٫۸۷	۰٫۵۸	۰٫۷۷	۰٫۵	۰٫۵۵	۰٫۳۹	۰٫۶۰
Al_2O_3	۱۱٫۷۵	۱۲٫۳۷	۱۱٫۹۵	۱۱٫۵۶	۱۱٫۴۲	۱۴٫۷۰	۱۵٫۱۶	۱۶٫۶۲	۱۳٫۹۶
Fe_2O_3	۶٫۱۷	۶٫۸۶	۴٫۲۱	۶٫۵۰	۳٫۴۰	۹٫۵۰	۸٫۷۸	۸٫۳۷	۷٫۴۸
FeO	۱۲٫۳۹	۱۱٫۵۹	۱۳٫۷۹	۱۲٫۳۳	۱۳٫۵۰	۸٫۲۳	۹٫۰۹	۹٫۳۴	۹٫۳۴
MnO	۰٫۳۳	۰٫۳۲	۰٫۳۰	۰٫۳۱	۰٫۲۹	۰٫۲۴	۰٫۰۷	۰٫۱۲	۰٫۱۳
MgO	۱۰٫۱۵	۱۰٫۲۹	۹٫۶۴	۱۰٫۲۰	۹٫۹۹	۹٫۸۲	۹٫۹۰	۹٫۱۴	۹٫۷۱
CaO	۱۱٫۲۲	۱۱٫۲۲	۱۱٫۲۲	۱۱٫۲۸	۱۱٫۰۸	۹٫۸۲	۱۰٫۲۲	۱۰٫۲۳	۱۰٫۰۲
Na_2O	۱٫۶۰	۱٫۶۶	۱٫۵۷	۱٫۵۶	۱٫۵۸	۲٫۲۱	۲٫۱۳	۲٫۱۳	۲٫۹۱
K_2O	۱٫۱۰	۱٫۱۸	۱٫۳۱	۰٫۹۳	۱٫۲۴	۰٫۳۸	۰٫۳۹	۰٫۴۴	۰٫۳۳
F	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۳	۰٫۰۰	۰٫۱۸	۰٫۲۲	۰۰٫۰	۰۰٫۰	۰٫۳۳
Cl	۰٫۰۳	۰٫۰۰	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۴	۰٫۰۱
OH	۲٫۰۷	۲٫۰۸	۲٫۰۲	۲٫۰۷	۱٫۹۴	۲٫۰۰	۲٫۱۴	۲٫۱۱	۱٫۹۰
~O	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۲	۰٫۰۰	۰٫۰۸	۰٫۰۹	۰٫۰۰	۰٫۰۱	۰٫۱۴
مجموع	۱۰۲٫۶۱	۱۰۲٫۷۳	۱۰۱٫۲۰	۱۰۲٫۵۸	۱۰۰٫۰۳	۱۰۲٫۲۳	۱۰۳٫۷۸	۱۰۲٫۹۵	۱۰۰٫۰۹
تعداد کاتیوها براساس ۲۳ اکسیژن									
Si	۶٫۵۳	۶٫۴۳	۶٫۵۱	۶٫۵۳	۶٫۶۲	۶٫۳۶	۶٫۳۶	۶٫۲۴	۶٫۴۷
Ti	۰٫۰۷	۰٫۰۷	۰٫۱۰	۰٫۰۶	۰٫۰۹	۰٫۰۶	۰٫۰۶	۰٫۰۴	۰٫۰۷
Al^{iv}	۱٫۴۷	۱٫۵۷	۱٫۴۹	۱٫۴۷	۱٫۳۸	۱٫۶۴	۱٫۶۴	۱٫۷۶	۱٫۵۳
Al^{vi}	۰٫۵۳	۰٫۵۴	۰٫۵۹	۰٫۵۰	۰٫۶۲	۰٫۸۲	۰٫۸۷	۰٫۰۱	۰٫۸۶
Fe^{3+}	۰٫۶۷	۰٫۷۴	۰٫۴۷	۰٫۷۱	۰٫۳۸	۱٫۰۲	۰٫۹۳	۰٫۸۹	۰٫۸۲
Fe^{2+}	۱٫۵۰	۱٫۴۰	۱٫۷۰	۱٫۴۹	۱٫۶۷	۰٫۹۸	۱٫۰۷	۱٫۱۱	۱٫۱۴
Mn	۰٫۰۴	۰٫۰۴	۰٫۰۴	۰٫۰۴	۰٫۰۴	۰٫۰۳	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۲
Mg	۲٫۱۹	۲٫۲۱	۲٫۱۲	۲٫۲۰	۲٫۲۱	۲٫۰۹	۲٫۰۷	۱٫۹۳	۲٫۱۰
Ca	۱٫۷۴	۱٫۷۳	۱٫۷۷	۱٫۷۵	۱٫۷۶	۱٫۵۰	۱٫۵۴	۱٫۵۵	۱٫۵۶
Na	۰٫۴۵	۰٫۴۷	۰٫۴۵	۰٫۴۷	۰٫۴۵	۰٫۶۱	۰٫۵۸	۰٫۵۹	۰٫۵۴
K	۰٫۲۰	۰٫۲۲	۰٫۲۵	۰٫۱۷	۰٫۲۴	۰٫۰۷	۰٫۰۷	۰٫۰۸	۰٫۰۶
F-mol	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۸	۰٫۱۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۱۵
Cl-mol	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۱	۰٫۰۰
OH-mol	۱٫۹۹	۲٫۰۰	۱٫۹۸	۲٫۰۰	۱٫۹۲	۱٫۹۰	۲٫۰۰	۱٫۹۹	۱٫۸۵
Mg/(Mg+Fe)	۰٫۵۰	۰٫۵۱	۰٫۴۹	۰٫۵۰	۰٫۵۲	۰٫۵۱	۰٫۵۱	۰٫۴۹	۰٫۵۲

[Downloaded from ijcm.ir on 2025-03-16]
[DOR: 20.1001.1.17263689.1399.28.1.5.5]
[DOI: 10.29252/ijcm.28.1.71]

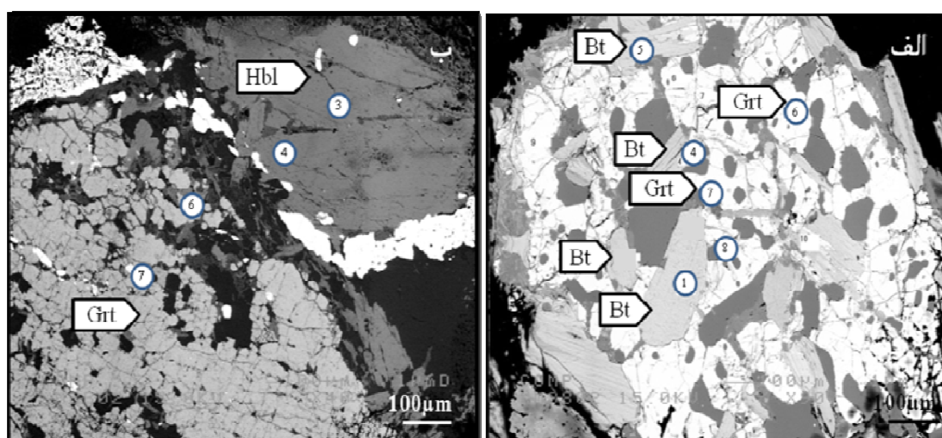


شکل ۵ الف) رده‌بندی آمفیبول‌های موجود در نمونه‌های آمفیبولیت و گارنت آمفیبولیت [۲۰]. همه نمونه‌ها در گستره آمفیبول‌های کلسیمی قرار دارند. ب) جایگاه ترکیبی آمفیبول‌ها در آمفیبولیت‌ها و گارنت آمفیبولیت‌های منطقه گل‌گهر، بر اساس نمودار تقسیم‌بندی آمفیبول‌های کلسیمی [۲۰].

زمین دماسنجی و زمین فشارسنجی

تعیین دما و فشار کانی‌ها با توجه به ترکیب شیمیایی آن‌ها بر این فرض استوار است که مجموعه کانی‌های هر سنگ در شرایط تعادلی تشکیل شده باشند. در واقع، این دما فشارسنجها بر اساس حساسیت توزیع عناصر در ساختار کانی‌ها و یا طی تبادلات شیمیایی، نسبت به دما و یا فشار طراحی شده‌اند.
چندین روش برآورد دما و فشار در سنگ‌های متاپلیتی و متابازیتی پیشنهاد شده است. در این پژوهش برای تعیین دما و فشار تشکیل سنگ‌ها سعی شد تا از کانی‌هایی که کنار هم در حال تعادل هستند استفاده شود و همچنین با توجه به ترکیب کانی‌ها روش مناسب از بین واسنجی‌های رایج انتخاب گردد (شکل ۶).

زمین دماسنج گارنت-بیوتیت: دماسنجی بر پایه تغییرات مقادیر Fe و Mg در گارنت و بیوتیت‌های در حال تعادل و همزیست در سنگ‌های رسی همواره مورد توجه زمین‌شناسان بسیاری بوده است [۲۱-۲۵]. روش‌های موجود دارای محدودیت‌هایی است. با بررسی محدودیت‌های هر روش و با توجه به ترکیب کانی‌های منطقه، از روش مرجع [۲۱] استفاده شد. در این روش، بیوتیت‌های دارای تیتانیم بالا (بیش از ۰٫۱۶۳) و یا گارنت دارای X_{Spss} بالا (بیش از ۰٫۲) نباید استفاده شود. برای برآورد دمای حاکم بر دگرگونی، با استفاده از مقادیر اکسیدهای به‌دست آمده از تجزیه‌های ریزکاو الکترونی، گستره‌های دمایی تعیین شد. دمای به‌دست آمده حدود ۵۵۰ تا ۵۷۸ درجه سانتی‌گراد است (جدول ۵). گستره دمایی به‌دست آمده بیانگر اواخر رخساره شیست سبز تا اوایل رخساره آمفیبولیت است که با شواهد کانی‌شناسی این سنگ‌ها همخوانی دارد.



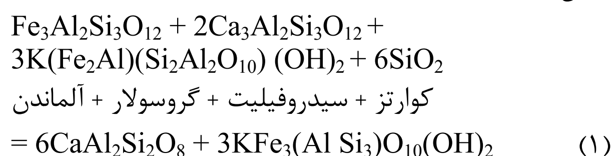
شکل ۶ نقاط تجزیه شده توسط تجزیه ریزکاوالکترونی که نشان دهنده الف) وجود بیوتیت درون گارنت‌های متاپلیت‌ها و ب) همجواری هورنبلند و گارنت در گارنت آمفیبولیت‌های منطقه گل‌گهر هستند.

[Downloaded from ijcm.ir on 2025-03-16]
[DOR: 20.1001.1.17263689.1399.28.1.5.5]
[DOI: 10.29252/ijcm.28.1.71]

جدول ۵ نتایج دماسنجی به روش گارنت – بیوتیت برای متاپلیت‌های منطقه گل‌گهر.

نمونه	Go4-70-6	Go4-70-7	Go4-70-8
گارنت			
آلماندین	۰٫۶۳	۰٫۶۳	۰٫۶۱
پیروپ	۰٫۱۴	۰٫۰۹	۰٫۱۳
اسپسارتین	۰٫۰۴	۰٫۰۶	۰٫۰۴
گروسولار	۰٫۱۹	۰٫۲۰	۰٫۲۱
بیوتیت			
Mg/Mg+Fe	۰٫۵۴	۰٫۵۳	۰٫۵۴
Ln Kd (Gt-Bi)	۱٫۷	۲٫۰۱	۱٫۶۴
[21]	۵۵۰ °C	۵۵۵ °C	۵۷۸ °C

فشارسنج گارنت-بیوتیت-پلاژیوکلاز- کوارتز: برای تعیین دما و فشار، از زمین دماسنج گارنت- بیوتیت- پلاژیوکلاز و کوارتز (GBPQ) واسنجی شده توسط وو و همکاران [۲۶] استفاده شد که نتایج آن در جدول ۶ ارائه شده است. بر اساس این روش و رابطه زیر فشار ۳٫۷ تا ۴٫۶ کیلوبار برای میکاشیست‌ها تعیین شد:



$$Fe_3Al_2Si_3O_{12} + 2Ca_3Al_2Si_3O_{12} + 3K(Fe_2Al)(Si_2Al_2O_{10})(OH)_2 + 6SiO_2$$

کوارتز + سیدروفیلیت + گروسولار + آلماندن

$$= 6CaAl_2Si_2O_8 + 3KFe_3(Al\,Si_3)O_{10}(OH)_2 \quad (۱)$$

آنیت + انورتیت

دما فشارسنجی بر اساس ترکیب آمفیبول: زنک و همکارش [۲۷] به طور تجربی وابستگی آلومینیوم به فشار و سیلیسیم به دما را در آمفیبول‌های کلسیمی موجود در مجموعه کانیایی آمفیبول + پلاژیوکلاز + کوارتز نشان دادند. این روش دمافشارسنجی اصلاح شد و می‌توان آن را در گستره ترکیبی گسترده‌ای از آمفیبول‌های کلسیمی به کار برد؛ بر این اساس دماهای ۵۸۹ تا ۶۱۳ درجه سانتی‌گراد برای آمفیبولیت‌ها و ۶۱۳ تا ۶۴۱ درجه سانتی‌گراد برای گارنت آمفیبولیت‌ها به دست آمد (جدول ۷). محاسبات فشارسنجی برپایه این روش نیز فشارهای ۴٫۷ تا ۴٫۹ کیلوبار را برای آمفیبولیت‌ها و ۴٫۳ تا ۵٫۶ کیلوبار را برای گارنت آمفیبولیت‌ها نشان می‌دهد (جدول ۷).

$$T[K] = 4701/(1.825 - 1.987\ln(8/15.5 - Si_{Am}/sum_{Kat} + 0.07531)) \quad (۲)$$

$$P[kbar] = ((-425 - 1719\,(XAl_M/(XAl_M + (Fe^{3+}_{Am}/2.763)) + 2.75\,T(K) + 1.987\,T(K)\ln(XAl_M)) + 1)/1000 \quad (۳)$$

که در این روابط T دما بر حسب کلوین، P فشار بر حسب کیلوبار، $XAl_M = (Si_{Am} + Al_{Am} - 8)/2.763$ و Si_{Am}، Al_{Am}، Fe^{3+}_{Am} و sum_{Kat} به ترتیب برابر با مقدار سیلیسیم، آلومینیم، Fe^{+3} و مجموع کاتیون‌ها در آمفیبول هستند.

جدول ۶ نتایج فشارسنجی به روش GBPQ [۲۶] برای متاپلیت‌های منطقه گل‌گهر.

نقاط.	GO270-4-2	GO270-5-1	GO270-5-2	GO270-6-1
Xalm	۰٫۶	۰٫۷	۰٫۶	۰٫۶
Xpyr	۰٫۱	۰٫۲	۰٫۲	۰٫۲
Xgros	۰٫۳	۰٫۱	۰٫۲	۰٫۲
Xan	۰٫۰	۰٫۷	۰٫۵	۰٫۴
Xab	۰٫۷	۰٫۳	۰٫۵	۰٫۶
Xor	۰٫۳	۰٫۰	۰٫۰	۰٫۰
lnKd(Mg)	-۱۵٫۷	۱۳٫۹	۴٫۳	۲٫۷
lnKd(Fe)	-۲۱٫۵	۸٫۵	-۰٫۸	-۲٫۴
P(GBPQ, ave)	۴٫۶	۳٫۷	۴٫۶	۴٫۱
P(GBPQ, Model 1)	۶٫۶	۴٫۲	۵٫۸	۵٫۴
P(GBPQ, Model 2)	۲٫۷	۳٫۲	۳٫۵	۲٫۹

Xalm: مقدارفعالیت آرمانی آلماندین در گارنت؛ Xpyr: مقدارفعالیت آرمانی پیروپ در گارنت؛ Xgros: مقدارفعالیت آرمانی گروسولار در گارنت؛Xan: مقدار فعالیت آنورتیت در پلاژیوکلاز؛ Xab: مقدار فعالیت آلبیت در پلاژیوکلاز؛ Xor: مقدار فعالیت ارتوکلاز در پلاژیوکلاز؛ LnKd(Mg): ضریب توزیع Mg بین بیوتیت و گارنت؛ LnKd(Fe): ضریب توزیع Fe بین بیوتیت و گارنت؛ P(GBPQ, Model1): فشار محاسبه شده بر اساس روش یک فشارسنج؛ P(GBPQ, Model 2): فشار محاسبه شده بر اساس دو روش فشارسنجی GBPQ؛ P(GBPQ, ave): میانگین فشار محاسبه شده بر اساس دو روش فشارسنجی GBPQ.

[Downloaded from ijcm.ir on 2025-03-16]
[DOR: 20.1001.1.17263689.1399.28.1.5.5]
[DOI: 10.29252/ijcm.28.1.71]

جدول۷ برآورد دما و فشار دگرگونی بر اساس ترکیب آمفیبول [۲۷] منطقه گل‌گهر.

آمفیبولیت	T□C ±37□C	P (kb) ±1.2kb
GO2-92-1-1	۶۰۱٫۲	۴٫۷
GO2-92-1-2	۶۱۳٫۲	۴٫۹
GO2-92-2-1	۶۰۷٫۹	۴٫۹
GO2-92-2-2	۶۰۱٫۲	۴٫۷
GO2-92-3-1	۵۸۹٫۹	۴٫۷
گارنت آمفیبولیت		
GO2-98-1-3	۶۲۸٫۴	۵٫۵
GO2-98-1-4	۶۲۷٫۲	۵٫۶
GO2-98-1-5	۶۴۱٫۸	۴٫۳
GO2-98-2-3	۶۱۳٫۷	۵٫۴

برداشت

در منطقه گل‌گهر، سنگ‌های مختلفی از جمله سنگ‌های متاپلیتی و متابازیتی با ترکیب کانی‌شناسی متفاوت مربوط به دو رخساره شیست سبز و آمفیبولیت حضور دارند. با حضور کانی‌هایی چون موسکویت، کلریت و کوارتز در متاپلیت‌ها و همزمان با افزایش دما، کانی‌های بیوتیت و گارنت ایجاد شده‌اند. ظهور مجموعه کانیایی هورنبلند + کوارتز و بدون پلاژیوکلاز نشان از ورود به رخساره آمفیبولیت دارد که در ادامه با اضافه شدن کانی‌هایی چون پلاژیوکلاز و گارنت به ترکیب سنگ به ترتیب آمفیبولیت و گارنت‌آمفیبولیت‌های مجموعه دگرگونی شکل گرفته‌اند. در نزدیکی کانسار، سیلیمانیت‌شیست‌های منطقه گل‌گهر حضور دارند که آشکارا نشان از افزایش دما و پیشرفت دگرگونی دارد. نتایج دمافشارسنجی برپایه تغییرات عناصر موجود در زوج گارنت-بیوتیت و گارنت-بیوتیت-پلاژیوکلاز و کوارتز نشان دهنده دمایی در حدود ۵۵۰ تا ۵۷۸ درجه سانتی‌گراد و فشار ۳٫۷ تا ۴٫۶ برای میکاشیست‌هاست. دمای محاسبه شده برای آمفیبولیت‌ها و گارنت آمفیبولیت‌ها به ترتیب ۵۸۹ تا ۶۱۳ درجه سانتیگراد و ۶۱۳ تا ۶۴۱ درجه سانتیگراد گزارش می‌شود. بر اساس نتایج به دست آمده، فشار حاکم بر گارنت آمفیبولیت‌های منطقه گل‌گهر برابر با ۴٫۳ تا ۵٫۶ کیلوبار است، در حالی که فشار به دست آمده از آمفیبولیت‌های مورد بررسی در منطقه گل‌گهر پایین‌تر و ۴٫۷ تا ۴٫۹ کیلوبار است. شرایط دما و فشار به‌دست آمده برای این سنگ‌ها نشان‌دهنده رخداد دگرگونی ناحیه‌ای پیشرونده از نوع ابوکوماست که با جایگاه زمین‌ساختی منطقه گل‌گهر و پهنه سنندج سیرجان به عنوان یک پهنه فرورانشی همخوانی دارد.

مراجع

[1] Yaghoobi A., "*Investigation of geochemistry and genesis of number 3 anomaly Gol-Gohar deposit*", Msc thesis, Shiraz Unieversity, (1999) (130p) (In persian).

[2] Poorkhak F., "*Paragenesis, Petrogenesis and Petrochemicals of Gol-Gohar Iron Ore (Anomaly No. 30)*" Msc thesis, Shahid Bahonar Unieversity, (2003) (296p) (In persian).

[3] Babaki A., Aftabi A.J., "*Investigation on the model of Iron mineralization at Gol-Gohar Iron deposit, Sirjan-Kerman*" Iranian of Geology Science, 16 (61) (2006) 40-59 (in Persian).

[4] Bayati rad Y., "*Investigation origin of Gol-Gohar iron deposit*", Msc thesis, Tehran Unieversity, (2009) (In persian).

[5] Asghari g., "*Investigation of genesis and formation conditions of Gol-Gohar iron ore deposit and host rocks*", Msc thesis, Tehran Unieversity, (2009) (In persian).

[6] Torabian S., "*Mineralization and genesis of number 3 anomaly in Gol-Gohar mine, based on the trace elements*", Msc thesis, Tarbiat Moalem Unieversity, Tehran (2006) (130p) (In persian).

[7] Dalfardi M., "*Investigation of sulfur origin in minerals of sulfide mines 1, 2 and 3 of Gol-Gohar Iron Ore"* Msc thesis, Damghan Unieversity, (2011) (134p).

[8] Wu C,M., Cheng B,H., "*Valid garnet–biotite (GB) geothermometry and garnet–aluminum silicate–plagioclase–quartz (GASP) geobarometry in metapelitic rocks*" Lithos 89 (2006) 1 – 23.

[9] Stockline J., "Structural history and tectonics of Iran", Areview- Amer: Ass. Petrol, Geol, Bull. 52.7 (1968) 1229-1258.

[10] Gilg H.A., Boni M., Balassone G., Allen C.R., Banks D., Moore F., "*Marble-hosted sulfide ores in the Anguran Zn–(Pb–Ag) deposit, NWIran: interaction of sedimentary brines with a metamorphic core complex*", Mineralium Deposita 41 (2006) 1–16.

[11] Daliran F., "*The carbonate rock-hosted epithermal gold deposit of Agdarreh, Takab*

[Downloaded from ijcm.ir on 2025-03-16]

[DOR: 20.1001.1.17263689.1399.28.1.5.5]
[DOI: 10.29252/ijcm.28.1.71]

[DOI: 10.29252/ijcm.28.1.71]
[DOR: 20.1001.1.17263689.1399.28.1.5.5]
[Downloaded from ijcm.ir on 2025-03-16]

Stephenson N.C.N., Ungaretti L., Whittaker E.J.W., Youzhi G., "*Nomenclature of amphiboles: Report of the subcommittee on amphiboles of the International Mineralogical Association, Commission on new minerals and mineral names*", Canadian Mineralogist, Vol. 35 (1997) 219-246.

[21] Hodges K. V. Y., Spear, F. S., "*Geothermometry, geobarometry and the Al_2SiO_5 triple point at Mt. Moosilauke:, New Hampshire*", American Mineralogist 67 (1982) 1118-1134.

[22] Dasgupta S., Sengupta P., Guha D., Fukuoka M.,"*A refined garnet-biotite Fe-Mg exchange geothermometer and its application in amphibolites and granulites*", Contributions to Mineralogy and Petrology 109 (1991) 130-137.

[23] Holdaway M. J., Lee S. M., "*Fe-Mg cordierire stabiliry in high grade pelitic rocks based on experimental, theoretical and natural observations*", Contribution to Mineralogy and Petrology 63 (1977) 175-198.

[24] Perchuk L.L., Lavrent'eva I.V., "*Experimental investigation of exchange equilibria in the system cordierite–garnet–biotite. In: Saxena, S.K. (Ed.), Kinetics and Equilibrium in Mineral Reactions*", Springer-Verlag, New York, (1983) 199–239.

[25] Ferry J.M., Spear F.S., "*Experimental calibration of the partitioning of Fe and Mg between biotite and garnet*", Contributions to Mineralogy and Petrology 66 (1978) 113– 117.

[26] Wu C., Zhang J., Ren L., *Empirical garnet-biotite-plagioclase-quartz (GBPQ) geobarometry in medium to high-grade metapelites*", Journal of Petrology 45 (2004) 1907-1921.

[27] Zenk M., Schulz B., "*Zoned Ca-amphiboles and related P-T evolution in metabasites from the classical Barrovian metamorphic zones in Scotland*", Mineralogical Magazine 68 (2004) 769-786.

geothermal field, NW Iran—hydrothermal alteration and mineralization", Mineralium Deposita 43 (2008) 383–404.

[12] Sabzehei M., "*Geological map of Iran, 1:00000 series, Gol-gohar quadrangle*", Geological Survey, Iran, (1994).

[13] Berberian M., "*Master blind thrust faults hidden under the Zagros folds: active basement tectonics and surface morphotectonics*", Tectonophysics 241 (1995) 193–224.

[14] Ghalamghash J., Mirnejad H.,"*Report of dating Gol-Gohar metamorphic complex, Tehran padir consulting engineer company*", 40p (2008).

[15] Whitney D., Evans B.,"*Abbreviations for names of rock forming minerals*", American mineralogist 95 (2010) 185-187.

[16] Deer W.A., Howie R.A., Zussman J., "*An introduction to the rock forming minerals*", 2nd edition, Longman Scientific and Technical, London (1992).

[17] Foster M. D., "*Interpretation of the composition of trioctahedral micas"* United States Geological Survey Professional Paper, 354-B (1960) 11-46.

[18] Deer W. A., Howie R. A., Zussman J., "*Rock Forming Minerals*", Volume 2B. Double-Chain Silicates. Geological Society, London, 2nd edition (1997).

[19] Droop G. T. R., "*A general equation for estimating Fe3+ Concentration in ferromagnesian silicates and oxides from microprobe analysis, using stoichiometric criteria*", Mineralogical Magazine, 51 (1987) 431-435.

[20] Leake B.E., Woolley A.R., Arps C.E.S., Birch W.D., Gilbert M.C., Grice J.D., Hawthorne F.C., Kato A., Kisch H.J., Krivovichev V.G., Linthout K., Laird J., Mandarino J., Maresch, W.V., Nickel E.H., Rock N.M.S., Schumacher J.C., Smith D.C.,